

해저 Trench 설치에 의한 방파제 시스템의 안전성 평가

김 성 덕

청주대학교 토목환경공학과
(2008. 10. 17. 접수 / 2008. 12. 31. 채택)

The Safety Assessment to Breakwater Systems by Placing Submarine Rectangular Trench

Sung Duk Kim

Department of Civil and Environmental Engineering, Cheongju University
(Received October 17, 2008 / Accepted December 31, 2008)

Abstract : The present study is to estimate the effect of wave height affecting at the front face of breakwater systems, when a submarine trench is dredged in the distant offshore from outer breakwater. The wave diffraction field, which is important hydraulic factor in the ocean, is considered to be two dimensional(2D) plane and the configuration of the submarine trench on the sea bed designated by single horizontal long-rectangular system. The numerical simulation is performed by using Green function based on the boundary integral equation and meshed at moving boundary conditions. The results of present numerical simulations are illustrated by applying the normal incidence. It is shown that the ratios of wave height reduction at the front face of breakwater systems are approximately 20% by the effect of placing long trench on the sea bed. This study can effectively be utilized for safety assessment to various breakwater systems in the ocean field.

Key Words : submarine trench, wave diffraction, green function, boundary integral equation, hydraulic factor, wave height reduction

1. 서론

일반적으로 항만 및 어항의 안전을 위하여 외해에 일직선 방파제 또는 우각부 방파제¹⁾를 설치한다. 외해에서 형성되어 진행되는 파는 직접적으로 방파제와 상호작용을 하기 때문에 방파제 전면에서의 안전성을 평가해야만 한다. 특히, 태풍 또는 Storm surge와 같은 고파랑은 방파제에 큰 영향을 주어 방파제 및 방파제 배후의 해안에서 치명적인 손실을 입힌다.

최근에는 쓰나미와 같은 장주기파를 갖는 지진해일이 동남아를 비롯하여 일본과 중국에서 발생하여 해당 지역에 큰 피해를 주었고 우리나라 동해안과 보령에서도 이상해일로 인해 많은 피해를 입었다. 이처럼 고파랑과 장주기파에 의해 발생하는 파랑에너지의 집중현상은 방파제 제간부의 안전성에 영향을 미칠 수 있는 요인이 되며 배후의 해안가에도 큰 영향을 미친다.

파랑에너지의 집중현상 및 천해파의 파고를 외해에서부터 감소시키기 위하여 다양한 방법들이 시도되고 있다. 최근에는 해수의 수질과 항로의 확보, 자연경관의 보존, 파고감쇠를 목적으로 해저 준설이 실시되고 있다. 해저 준설은 장방형의 직사각형으로 된 trench 형태로 실시되고 있으며, 해저 trench는 수심의 불연속성을 이용하여 파고를 감쇠하는 역할을 한다. 해저 trench와 파랑의 상호작용 문제에 관한 연구로는 Lee와 Ayer²⁾, Kirby와 Dalrymple³⁾의 연구를 들 수 있다. 이들의 연구는 2차원 파랑문제의 해석해 및 수치해를 각각 제시하였다. 유한 크기의 평면 2차원 또는 3차원 문제에 대하여 Willimas와 Vazquez⁴⁾, McDougal 등⁵⁾의 연구가 있다. 이들의 연구는 규칙파를 대상으로 하였으며, 해저 trench와 파랑과의 상호작용에 관하여만 제시하였다.

본 연구는 외해 방파제(offshore breakwater) 경계, trench 경계, 수심의 불연속성 등 3가지 경우의 복합적 상호관계에 관한 것이고 각각의 경계조건에 대한 경계적분방정식을 적용하여 파랑과 해안구조

물 및 해저 지형의 상호작용을 조사한 것이다. 즉, 해저 trench가 외해에 준설될 때 일직선 방파제 또는 우각부 형태의 방파제 전면부에서의 파고 감소 효과 및 방파제 배후에서의 감소효과를 조사한 것이다. 해저 trench의 크기는 수평으로 긴 형태의 장방향으로 고안하고 선형파 이론을 이용하며, 주기가 10초인 파가 직각으로 입사할 때 수치계산을 한다. 본 연구에서 얻어진 결과들을 그래프 및 2D로 나타낸다.

2. 이론

2.1. 지배방정식

Fig. 1은 방파제 시스템(일직선 방파제 또는 우각부 방파제)으로부터 외해쪽으로 떨어진 곳에 해저 trench를 설치한 경우의 모형을 나타낸다. S_1 은 trench의 경계선, S_2 는 방파제의 경계선을 나타낸다. AB라인은 방파제 전면에서의 수치모형 계산 라인을 나타낸다. Fig. 2는 Fig. 1의 CD 라인에서 trench와 방파제의 단면도를 나타낸다.

유체의 성질을 비점성, 비압축성 그리고 유체입자의 운동을 비회전성으로 하는 미소진폭파 운동

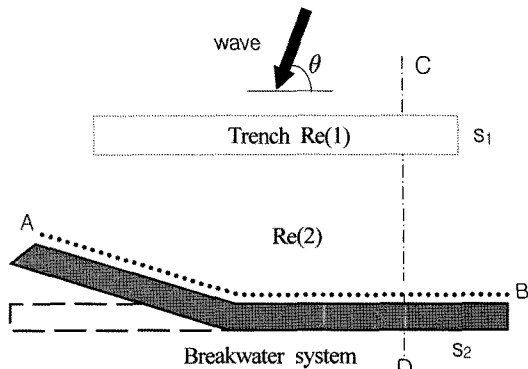


Fig. 1. Layout of trench and breakwater systems.

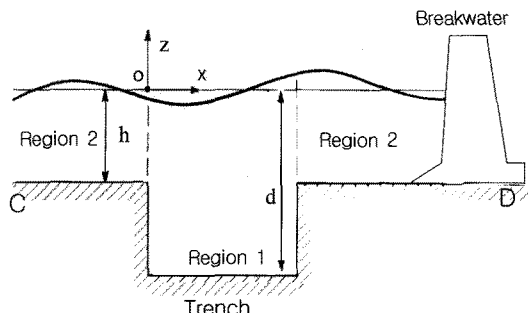


Fig. 2. Definition sketch of trench and boundary surfaces.

으로 가정하면 속도 포텐셜은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Phi_1(x, y, z, t) = \phi_1(x, y) \cosh k_1(z + d)e^{-i\sigma t} \quad (1)$$

$$\Phi_2(x, y, z, t) = \phi_2(x, y) \cosh k_2(z + h)e^{-i\sigma t} \quad (2)$$

여기서, σ 는 각주파수 ($=2\pi/T$, T 는 주기), t 는 시간이다. 식 (1)은 trench 준설에 의한 trench 내부 영역(Region 1)의 속도 포텐셜이고, 식 (2)는 외해 및 방파제와 trench 사이의 영역, 그리고 방파제 배후의 영역(Region 2)의 속도 포텐셜이다. k_1, k_2 는 파수($2\pi/L$, L 은 파장)이고, 다음의 분산관계식으로부터 얻어진다.

$$\omega^2 = gk_1 \tanh(k_1 d); \text{ Region 1} \quad (3)$$

$$\omega^2 = gk_2 \tanh(k_2 h); \text{ Region 2} \quad (4)$$

식 (1)과 식 (2)는 다음의 Helohltz 방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial y^2} + k_j^2 \phi_j = 0 \quad (j = 1, 2) \quad (5)$$

Re 1과 Re 2의 경계선상에서 질량수송 및 에너지 수송의 연속조건으로부터 다음의 관계식을 얻는다⁶⁾.

$$d \frac{\partial \phi_2}{\partial n} = h \frac{\partial \phi_1}{\partial n} \text{ on } S_1 \quad (6)$$

$$\Phi_1 = \Phi_2 \text{ on } S_2 \quad (7)$$

Region 2에서 포텐셜 함수 ϕ_2 는 다음의 방사조건을 만족해야 한다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial r} - ik_j \phi_2 \right) = 0 \quad (j = 1, 2) \quad (8)$$

여기서, r 은 trench 경계로부터 무한원방의 거리(radial distance)이다. 영역에서 입사파 함수 ϕ^I 와 반사파 함수 ϕ^R 는 선형화된 장파이론에 의해 다음과 같다.

$$\phi^j = \frac{igH}{2\sigma} e^{ik_j(x \cos \theta + y \sin \theta)} \quad (j = 1, 2) \quad (9)$$

$$\phi^R = \frac{igH}{2\sigma} e^{ik_j(x\cos\theta - y\sin\theta)} \quad (j = 1, 2) \quad (10)$$

여기서, g 는 중력가속도, H 와 θ 는 입사파고와 입사각이다. trench와 방파제에서의 경계인 S_1 과 S_2 상에 있는 경계조건은 trench가 없는 경우 식 (11)로 나타낼 수 있고, trench를 준설했던 경우 식 (6)을 적용하여 식 (12)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = -\left(\frac{\partial\phi^I}{\partial n} + \frac{\partial\phi^R}{\partial n}\right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = -\frac{h}{d}\left(\frac{\partial\phi^I}{\partial n}\right) \quad \text{on } S_1 \quad (12a)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = -\frac{h}{d}\left(\frac{\partial\phi^I}{\partial n} + \frac{\partial\phi^R}{\partial n}\right) \quad \text{on } S_2 \quad (12b)$$

경계적분방정식과 Green 함수를 적용하면, 방파제 경계와 해저 불연속 면 및 trench 영역에서의 상호작용으로 인해 임의지점에 있는 함수 $\phi(x, y)$ 는 trench를 준설했지 않은 경우에는 식 (13)으로 trench를 준설했던 경우에는 식 (14)로 나타낼 수 있다.

$$\phi(x, y) = -\int_{S_1} \left[\phi_2(r') \frac{\partial G_2}{\partial n}(r, r') + G_2(r, r') \frac{\partial\phi_2}{\partial n}(r') \right] dS \quad (13)$$

$$\phi(x, y) = -\int_{S_1+S_2} \left[\phi_j(r') \frac{\partial G_j}{\partial n}(r, r') + G_j(r, r') \frac{\partial\phi_j}{\partial n}(r') \right] dS \quad (14)$$

여기서, $j=1, 2$ 이고, 수역의 임의지점 $r=(x, y)$, 방파제 및 trench의 경계상의 점 $r'=(x', y')$ 이다. G_j ($j=1, 2$)는 Green 함수이고 다음 식으로 주어진다.

$$G_j(r, r') = \frac{i\pi}{2} H_0^{(1)}(k_j R) \quad (j = 1, 2) \quad (15)$$

여기서, $H_0^{(1)}(k_j R)$ 은 제 1종 0차의 Hankel 함수이다. $R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$ 이다.

식 (13)과 식 (14)에 경계조건을 적용하면 수역의 임의의 지점에 있는 함수 $\phi(x, y)$ 는 trench가 없는 경우 식 (16)으로, trench가 있는 경우 식 (17)로 나타낼 수 있다.

$$\phi(x, y) = -\int_{S_1} \left[\phi_2(r') \frac{\partial G_2}{\partial n}(r, r') + G_2(r, r') \left(\frac{\partial\phi^I}{\partial n} + \frac{\partial\phi^R}{\partial n} \right) \right] dS \quad (16)$$

$$\phi(x, y) = -\int_{S_1} \left[\phi_1(r') \frac{\partial G_1}{\partial n}(r, r') + G_2(r, r') \frac{h}{d} \left(\frac{\partial\phi^I}{\partial n} \right) \right] dS - \int_{S_2} \left[\phi_2(r') \frac{\partial G_2}{\partial n}(r, r') - G_2(r, r') \frac{h}{d} \left(\frac{\partial\phi^I}{\partial n} + \frac{\partial\phi^R}{\partial n} \right) \right] dS \quad (17)$$

따라서 식 (16)과 식 (17)을 해석하는 것에 의해서 $\phi(x, y)$ 가 결정된다. 수역의 임의점 (x, y) 에서 방파제 설치시 안정설계파고 산정에 기여할 수 있는 수리학적 인자인 회절계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_d = |\phi_j(x, y) + \phi^I(x, y)| \quad (j = 1, 2) \quad (18)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 수치모델의 검증

본 연구 수치모델의 검증을 위하여 trench가 없는 경우, 즉 단독으로 우각부 방파제가 설치될 때 유한 길이의 우각부 전면에서의 회절을 검토한 小丹와 大里⁷⁾의 수치해 및 실험치와 비교 및 검증을 실시하였다. 또한 보다 정확한 검증을 위하여 Penny와 Price⁸⁾의 이론을 Fourier급수 형태로 일반화 및 특별해를 각각 이용한 三井⁹⁾의 무한길이의 우각부 방파제에 대한 연구결과와도 비교 및 검증을 실시하였다(Fig. 3).

Fig. 3에서 실선은 小丹와 大里⁷⁾의 결과이고, 점선은 三井⁹⁾의 결과이며, 파선은 본 연구의 결과를 나타낸다. 이때 우각부의 각도는 135°이고, 우각부의 길이는 우각점에서 같은 길이로 설정하였으며 파랑의 입사각도는 45°로 설정하였다. 본 연구 결과는 小丹와 大里⁷⁾의 결과보다 약간 높은 회절값을 나타내지만, 분포의 경향은 유사하게 나타나고 있다. 무한하게 긴 방파제에 대한 결과(三井⁹⁾)와 유한한 방파제에 대한 결과(小丹와 大里⁷⁾)가 거의 일치하는 것은 小丹와 大里⁷⁾의 계산방법에 의문점이 남는다. 왜냐하면, 유한한 길이의 방파제는 위상차

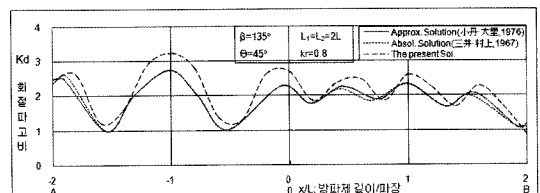


Fig. 3. Comparison of wave diffractions of present study with those of approximate and absolute solutions.

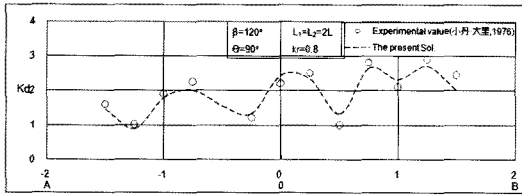


Fig. 4. Comparison of wave diffractions of present study with experimental values.

나 입사 또는 반사파의 상호작용에 의한 산란에 의해 차이가 발생할 수 있기 때문(Lee와 Williams¹⁰⁾)이며, 본 연구가 이러한 논지와 잘 일치한다고 판단된다.

Fig. 4에서 실선은 小丹와 大里7)의 실험 결과이고, 점선은 본 연구의 결과이며, 실험치와 계산치가 잘 일치하고 있음을 나타낸다.

Fig. 5는 trench를 설치했을 때 실험치(연주흥 등⁶⁾)와 본 연구의 결과를 비교한 것이다. x/L 은 파장 L 에 대하여 x 축을 무차원화 한 것이고, 이 경우 trench의 폭(b)과 길이(a)의 비($b/a=2$)는 2배로 하였다. 왜해서 파가 진행하여 불연속적인 면을 갖는 trench를 통과한 후에 회절파고비가 안정적으로 진행되는 것을 발견할 수 있으며, 수리실험과 본 연구의 결과의 값과 유형이 잘 일치하고 있다. 약간의 차이가 발생하는 이유는 수리실험에서 사용한 수조의 길이가 작아서 천해에서 진행하는 장주기파를 재현하는데 공간적 한계가 발생했기 때문이라고 판단된다.

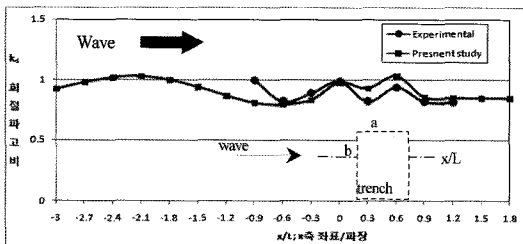


Fig. 5. Comparison of wave diffractions of present study with those of experimental study.

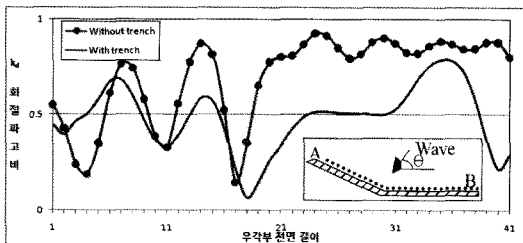


Fig. 6. Wave height distributions at the front face of refracted breakwater with or without trench ($\theta=90^\circ$).

3.2. Trench 설치에 의한 결과분석

본 연구에서의 모든 수치계산은 $10/L(L$; 입사파장)의 선요소(Line segment)로 분할하여 실시하였다. 입사주기는 10s, trench 영역의 수심(d)은 14m, 그 외의 영역 수심(h)은 7m, 그리고 입사각 45° 와 90° 의 조건에서 방파제의 안전성에 영향을 미치는 수리학적 인자인 회절파고비를 조사하였다. 방파제의 형태는 우각부 형태와 일직선 형태로 고안하여 설치하였다. Fig. 6은 제체각이 160° 인 우각부 형태의 방파제전면(AB 라인)에서 입사각이 90° 인 경우 trench를 설치했을 때와 trench가 없을 때의 파고분포를 조사한 것이고 Fig. 7은 입사각이 45° 인 경우이다. 실선은trench를 설치한 경우이고, 심볼은trench를 설치하지 않은 경우이다. 이 경우 trench 수심은 다른 영역 수심의 2배로 하였다.

trench 설치를 하지 않은 경우 반사파의 영향으로 파고의 증폭률이 높아지고 변곡점을 기점으로 우측에서는 거의 파고비가 1에 가까운 분포를 보이고 있다. trench를 설치한 경우, 전체적으로 파고가 감소하고 있으며, 방파제 전면에서의 반사파의 영향도 상당히 저감되는 것을 발견할 수 있다. 또한, 입사각이 90° 인 경우에 45° 인 경우보다 파고감소의 폭이 더 크게 나타났다.

Fig. 8은 일직선상 방파제 전면에서의 파고분포비를 나타낸다. trench를 설치한 경우의 파고분포가 그렇지 않은 경우보다 탁월하게 낮게 분포하고

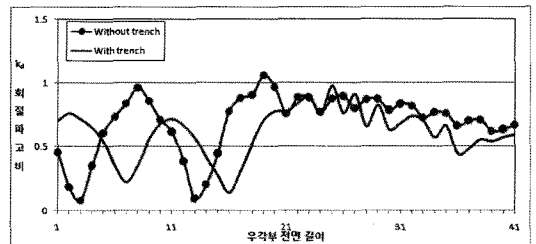


Fig. 7. Wave height distributions at the front face of refracted breakwater with or without trench ($\theta=45^\circ$).

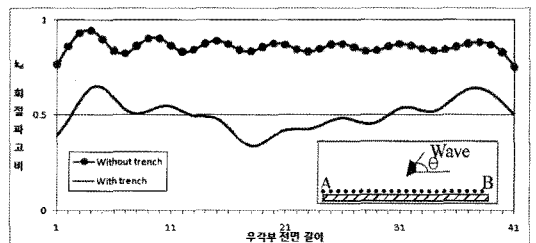


Fig. 8. Wave height distributions at the front face of straight-breakwater with or without trench.

있다. 일직선상 방파제의 특성상 고파랑이 해안에 내습할 때 방파제 중앙에서 많은 피해를 입게 되는데, 이때 trench를 설치하면 방파제 중앙에서 탁월한 파고 감쇠 효과를 얻을 수 있다.

즉, trench 설치를 통해서 방파제의 안전성을 확보하는 데 많은 도움을 준다는 것을 알 수 있다. 일직선상 방파제와 우각부 형태의 방파제를 비교해 보면, 일직선상의 방파제의 경우에 더 많은 파고 감쇠 효과를 얻을 수 있다. 이는 우각부 형태의 방파제에서는 방파제 전면에서 다중반사의 영향을 받으므로 감쇠폭이 적게 된다.

Fig. 9는 일직선상 방파제 및 우각부 형태의 방파제에서 trench의 유·무에 따른 방파제 전면 및 배후에서의 회절파고분포를 2차원(2D) 지형도로 나타낸 것이다. trench를 설치한 경우 외해에서부터 파 에너지가 저감되어 trench와 방파제 사이의 수역에서 회절파고분포가 낮게 되며 결국은 방파제의 안전에 좋은 효과를 나타내게 된다. 이후로 약화된 파 에너지가 계속해서 방파제 배후로 진행하게 되어 방파제 배후에서도 파고분포가 낮게 되며, 이는 해빈 및 해안 주변의 어항과 어촌의 안전에 기여하게 되는 역할을 하게 된다. 반면에 trench를 설치하지 않은 경우 방파제 전면에서의 파고분포가 peak성의 파봉(wave crest)으로 나타나며 파고가 높게 나타났다. 또한, 수심의 불연속성으로 인해 trench 전면에서의 반사가 발생하여 그만큼 방파제 수역으로의 진입을 억제하는 것으로 나타났으며, 이는 trench와 방파제 사이에서의 파봉(wave crest)을 완만하게 하는 역할을 한다. 이처럼 완만하게 된 파봉은 peak성의 파봉보다는 방파제 전면에 집중되

는 파력을 분산시키는 효과가 있어 방파제 안전에 더 효율적이라 할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 외해에서 파랑이 입사할 때, 우각부 형태의 방파제 및 일직선 방파제 전면 수역 및 배후 수역에서의 안전성 요소인 회절 파고분포에 대한 trench의 효과를 조사한 것이다. 수치적 모델은 경계 적분 방정식을 이용하였고, 방파제 시스템의 경계, trench의 경계 및 trench 수심의 불연속성 등 3가지 경우의 복합적 상호작용에 관한 것을 조사하였다.

우각부 방파제 전면에서 trench를 설치한 경우 방파제 전면에서 반사파의 영향이 줄어들었고, 파고의 증폭률도 낮아졌으며 완만한 파고분포를 나타냈다. 일직선 방파제 전면에서 trench를 설치한 경우 방파제 중심에서 탁월한 파고감쇠 효과가 나타났으며, 우각부 방파제에서보다 감쇠폭은 더 컸다. 이는 우각부 방파제에서는 다중반사가 발생하여 파고분포의 증폭률을 더 높이기 때문이다.

2차원 파고분포도를 조사해 보면 외해에서의 파랑이 불연속 수심을 갖는 trench 위를 통과하면서 파 에너지가 저감되어 trench와 방파제 사이의 수역에서의 파고감쇠 효과가 나타났다. 이후 방파제 배후 수역에서도 약화된 파 에너지로 인해 파고가 감쇠하였다. 또한, trench를 설치한 경우 파봉의 형태가 완만하여 peak성인 경우에 비해 방파제의 영향을 덜 받게 된다. 외해에서는 trench에 의해 다사 반사파가 발생하여 일부의 파랑이 외해로 되돌아가므로 그 만큼 방파제 및 해안 쪽으로의 파랑 진

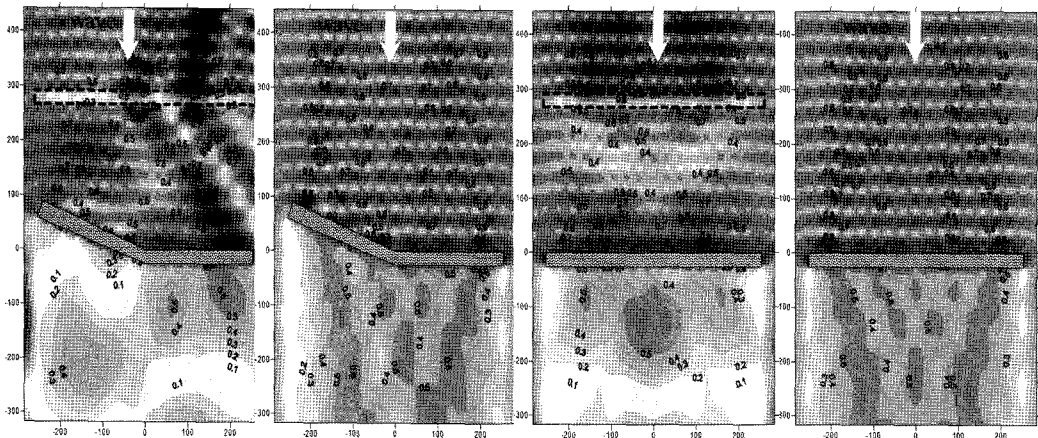


Fig. 9. Contour plots of diffraction coefficients at the breakwater systems with or without trench.

행을 억제할 수 있게 된다.

이상에서 본 연구는 최근에 많이 수행되고 있는 준설 작업과 다양한 형태의 방파제 시스템의 상호작용을 예측하여 방파제 설계 및 안전성 평가에 유용하게 사용될 것으로 기대된다. 또한, 방파제 수역과 해안과 어촌 마을의 안전성 평가에도 유용하게 사용될 것으로 기대된다. 향후 trench의 길이에 따른 방파제 전면에서의 파랑 상호작용과 파고 분포 및 trench와 방파제간의 거리에 따른 파랑 상호작용과 파고분포를 조사함으로써 방파제 안전성 확보를 위한 최상의 trench 길이와 trench와 방파제간의 거리를 설정한다.

참고문헌

- 1) 김성덕, “우각부 방파제의 안전성에 영향을 미치는 수리학적 거동”, 한국안전학회지, 제23권, 4호 (in press).
- 2) J.J. Lee and R.M. Ayer, “Wave propagation over a rectangular trench”, J. of Fluid Mechanics, Vol. 110, pp. 335~347, 1981.
- 3) J.T. Kirby and R.A. Dalrymple, “Propagation of obliquely incident water waves over a trench”, J. of Fluid Mechanics, Vol. 133, pp. 47~63, 1983.
- 4) A.N. Williams and J.H. Vazquez, “Wave interaction with a rectangular pit”, J. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 113, pp. 193~198, 1991.
- 5) W.G. McDougal, A.N. Williams, and K. Furukawa, “Multiple-Pit breakwaters”, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 122(1), pp. 27~33, 1996.
- 6) 연주흠, 이호진, 김경호, “불연속 지형을 갖는 천해역에서의 파의 변형에 대한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집B, 22권, 1-B호, pp. 1~10, 2002.
- 7) 小丹浩治, 大里滄男, “防波堤隅角部附近の波高分布に関する研究”, 港灣技術究報告書, 15卷, 第2号, pp. 55~88, 1976.
- 8) W.G. Penny and A.T. Price, “Diffraction of water waves by breakwaters”, Misc. Weapons Development Technical History 26, Artificial Harbors, Sec. 3D, 1944.
- 9) 三井村上, “海岸構造物 不連續部の 波高分布 (第2報)-隅角部附近の 波高分布-”. 第14回 海岸工學講演會論文集, 日本土木學會, pp. 53~58, 1967.
- 10) H.S. Lee and A.N. Williams, “The diffraction of multidirectional random waves by rectangular submarine pits”, J. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, Vol. 126(1), pp. 9~15, 2004.